بررسی عددی توربین بادی داریوس در کنار یک بزرگراه یک‌طرفه*
مقاله پژوهشی

صادق تودرباری(۱)   محمدجواد مغربی(۲)

چکیده *استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی‌های بادی و خورشیدی به یکی از موضوعات مهم و پرتکرار در میان محققان تبدیل شده است. ازاین‌رو تحقیقات فراوانی بر روی بهینه‌سازی وسایلی از جمله توربین‌های بادی و استفاده از آن‌ها در مناطقی که ظرفیت بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر را دارند، انجام شده است. در این مطالعه به امکان‌سنجی قرارگیری توربین بادی داریوس چهارپره در بزرگراه یک‌طرفه پرداخته شده است. این شبیه‌سازی با کمک مدل‌سازی دوبعدی و گذرا در نرم‌افزار تجاری فلوئنت انجام شده است. همچنین برای حل میدان جریان از روش دینامیک سیالات محاسباتی براساس مدل آشفتگی k-ω SST استفاده شده است. در اعتبارسنجی انجام‌شده، شبیه‌سازی حاضر توانست مطابقت مقبولی با نتایج آزمایشگاهی داشته باشد. در این پژوهش عملکرد توربین در سرعت‌های نوک پره مختلف بررسی شد که باتوجه‌به نتایج، حداکثر ضریب توان به‌دست‌آمده برابر ۰/۰۰۲۹۹ در سرعت نوک پره ۰/٦٤٤ اتفاق افتاده است و مقدار توان متناظر تولیدی در حدود ٦١/٨١ وات است.*

واژه های کلیدی انرژی باد، توربین بادی داریوس، دینامیک سیال محاسباتی، بزرگراه یک‌طرفه.

مقدمه

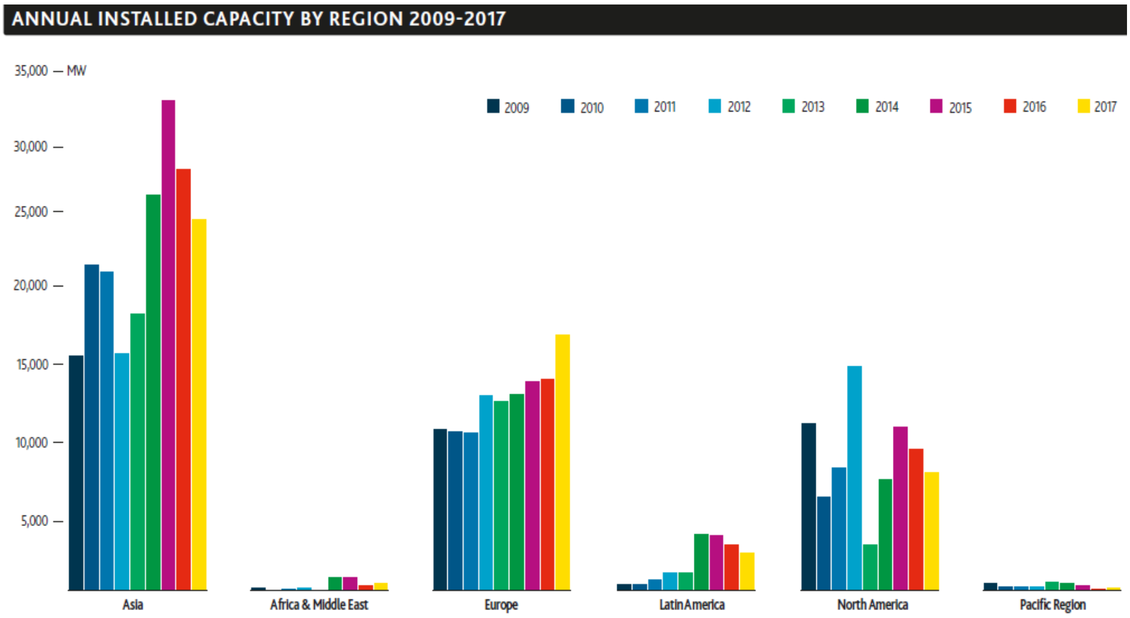
امروزه میزان استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در دنیا افزایش یافته است، به‌طوری‌که انرژی بادی ذخیره‌شدهٔ جهانی از سال ۲۰۰۱ تا سال ۲۰۱۷، ۲۳ برابر شده است [1]. این افزایش گویای این است که اهمیت بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر روزبه‌روز در میان کشورهای مختلف افزایش یافته است. یکی از انرژی‌های تجدیدپذیر که امروزه به یکی از مباحث پرکاربرد در میان محققان رواج پیدا کرده است، انرژی بادی است که این انرژی درحقیقت با ایجاد اختلاف دما بین ۲قسمت از کرهٔ زمین، در اثر تابش خورشید به‌وجود می‌آید. برای بهره‌برداری از انرژی باد، توربین‌های بادی مختلفی از لحاظ کاربرد و شکل ظاهری به‌وجود آمده‌اند. به‌طوری‌که تحقیقات زیادی در زمینهٔ آزمایشگاهی و عددی برای بهینه‌سازی توربین‌های بادی در سال‌های گذشته انجام شده است. همان‌طور که در شکل (۱) ملاحظه می‌شود، باتوجه‌به اهمیت بهره‌برداری از انرژی بادی، روزبه‌روز استفاده از توربین‌های بادی افزایش پیدا می‌کند.

توربین‌های بادی از نقطه‌نظر راستای چرخش‌محور دورانشان به ۲ نوع کلی توربین‌های محور افقی و محور عمودی تقسیم‌بندی می شود [2]. در توربین‌های بادی محور افقی، محور دوران موازی سطح زمین است، درحالی‌که در توربین‌های محور عمودی، راستای محور دوران عمود بر سطح زمین است. توربین‌های محور عمودی خود به ۲ دسته کلی توربین‌هایی براساس نیروی لیفت (داریوس) و برپایه نیروی درگ (ساونیوس) نیز تقسیم‌بندی می‌شوند.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۸/۹/۲۹ و تاریخ پذیرش آن ۹۹/۸/۲۵ می‌باشد.
DOI: 10.22067/jacsm.2021.56298.0

(۱) دانشجوی کارشناسی‌ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد.
(۲) نویسندهٔ مسئول، استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد.
Email: mjmaghrebi@um.ac.ir



شکل ۱ میزان ظرفیت بادی نصب‌شده از سال ۲۰۰۱ تا سال ۲۰۱۷ [3]

توربین‌های محور عمودی می‌تواند انتخابی مناسب برای تولید انرژی در مقیاس‌هاس کوچک به شمار آید [4]. به‌طورکلی توربین‌های محور عمودی دارای مزایا و معایبی نسبت به توربین‌های محور افقی است. به‌عنوان مثال توربین‌های محور عمودی معمولا در نزدیکی سطح زمین نصب می‌شوند، درنتیجه نصب و نگهداری تجهیزات سنگین این نوع از توربین‌ها مانند ژنراتور و جعبه‌دنده آسان‌تر می‌شود، ولی مشکلی که وجود دارد این است که در نزدیکی سطح زمین باد با سرعت کمتری به ارتفاعات وزیده می‌شود. پس مقدار انرژی دریافتی توربین‌های محور عمودی کمتر از محور افقی است [5]. مزیت دیگر توربین‌های محور عمودی نسبت به توربین‌های محور افقی، نیازنداشتن به مکانیزمی برای تشخیص جهت وزش باد است که درنتیجه این نوع از توربین‌ها می‌توانند باد را از هر جهتی دریافت کنند، ولی این مزیت با چندین محدودیت همراه است، مانند تغییر قدرت خروجی با زمان به‌علت تغییر در توان یک پره در یک دور چرخش کامل [6].

علاوه‌براین، توربین‌های محور عمودی رفته‌رفته به موضوع جذاب‌تری نسبت به توربین‌های محور افقی به‌دلیل طراحی ساده، هزینهٔ کم و نگهداری آسان تبدیل شده است [7]. به‌علاوه در مناطق شهری و مسکونی باد بسیار آشفته و ناپایدار است و با تغییر سریع سرعت و جهت همراه است [8]. در این محیطها توربین‌های محور عمودی دارای مزیت‌های فراوانی نسبت به توربین‌های محور افقی هستند [9]. همچنین محدودهٔ کاری سرعت نوک پره برای توربین‌های محور عمودی در بین ۱/۵ تا ٤ است، درحالی‌که برای توربین‌های محور افقی این محدوده بین ٦ تا ۱۰ است [10]. حال همین سرعت بالای نوک پره برای توربین‌های محور افقی خطراتی مانند ازبین‌رفتن پره‌ها در پی خواهد داشت [11]. ازاین‌رو، در این پژوهش برای محاسبهٔ عملکرد این نوع از توربین‌های بادی در بزرگراه، شبیه‌سازی دوبعدی ارزیابی شده است.

توربین‌های بادی داریوس نسب به توربین‌های بادی ساونیوس معایب و مزایا دارند که ازجمله مهم‌ترین مزایای آن می‌توان به بازده بالای آن اشاره کرد، درحالی‌که ضعف در خودراه‌اندازبودن یکی از معایب

توربین داریوس است. ازاین‌رو، تحقیقات فراوانی برای رفع این مشکل و افزایش کارایی توربین‌های داریوس انجام شده است. راستی و همکاران [12] روش‌های متفاوتی برای بررسی خودراه‌اندازی توربین داریوس ارزیابی شدند و توانستند تأثیرات مثبتی را بر روی خودراه‌اندازبودن این نوع توربین مشاهده کنند. محمد و همکاران [13] ۲۵ نوع مختلف ایرفویل را برای بهینه‌سازی توان خروجی بررسی کردند و با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی، افزایش ضریب توان ١٦درصدی را پیش‌بینی کردند. حسینی و گودرزی [14] برای افزایش قابلیت خودراه‌اندازی و محدودهٔ کاری، مدل جدیدی از توربین بادی محور عمودی را که ترکیبی از توربین داریوس و مدل بچ است، به‌صورت عددی ارزیابی کردند. همچنین بررسی‌هایی برای تأثیر زاویهٔ گام پره بر عملکرد توربین بادی داریوس انجام شده است [١٦و15].

در جهان امروز توربین‌های بادی، دیگر مانند گذشته فقط در مزارع استفاده نمی‌شوند، بلکه در فضاها و مکان‌های مختلفی نیز برای بهره‌برداری از انرژی باد استفاده می‌شوند. توربین‌های بادی به‌ویژه توربین‌های بادی محور عمودی باتوجه‌به اندازهٔ کوچک آن‌ها نسبت به توربین‌های محور افقی، قابلیت نصب در بالای پشت‌بام‌ها، کنار ریل قطار، در مجاورت بزرگراه‌ها و... را دارند. علاوه‌براین، تحقیقاتی در زمینهٔ عملکرد این نوع توربین‌ها در این مکان‌ها طی سال‌ها انجام شده است. ژو و همکاران [17] طرح جدیدی از توربین بادی محور عمودی همراه با پره‌های V شکل پیشنهاد کردند و برای بررسی عملکرد این توربین، شبیه‌سازی دوبعدی انجام دادند. آن‌ها باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده از این شبیه‌سازی، به این مطلب پی بردند که می‌شود با پره‌های راهنما سرعت باد را تا ٤٤ درصد افزایش داد. همچنین بلمیلی و همکاران [18] وسیله‌ای را که از ۳جزء تشکیل شده بود، برای بهره‌برداری از انرژی تجدیدپذیر پیشنهاد کردند. این وسیله که دارای یک توربین محور عمود از نوع ساونیوس است، می‌توان در مناطق مسکونی و حتی در مناطق دوردست مانند پمپ‌بنزین‌ها برای تأمین برق استفاده شود. باتوجه‌به نتایج، سیستم پیشنهادی دارای راندمان و قابلیت اطمینال مقبولی است. علاوه‌بر بررسی توربین‌های بادی بر روی پشت‌بام‌ها و مناطق دیگر، بررسی توربین‌های بادی در کنار ریل قطار هم می‌توانست موضوعی برای بحث در میان محققان باشد. ازاین‌رو بتی و همکاران [19] به شبیه‌سازی توربین محور عمودی از نوع ساونیوس در کنار قطار با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی با بهره‌گیری از نرم‌افزار اپن فوم پرداختند. باتوجه‌به اینکه توربین ساونیوس sشکل در این شبیه‌سازی با شکست روبه‌رو شد، آن‌ها مدل جدیدی از توربین ساونیوس ارائه و به بهینه‌سازی قطر و فاصله قرارگیری توربین نسبت به قطار پرداختند. باتوجه‌به نتایج می‌توان از انرژی الکتریکی تولیدشدهٔ توربین برای روشنایی برق چراغ‌های تول کمک گرفت.

بررسی قابلیت استخراج از انرژی به‌وجودآمده از حرکت اتومبیل‌ها در بزرگراه‌ها، در سال‌های گذشته در مرکز توجه بعضی محققان قرار گرفته است. خالید و همکاران [20] روند اتلاف انرژی حاصل از درگ اتومبیل را در جاده‌ها پژوهش کردند و ایدهٔ جدیدی برای استفاده از توربین محور عمودی برای استخراج انرژی هدررفتی که اتومبیل ایجاد می‌کرد، پیشنهاد کردند. موسی و همکاران [21] برای ارزیابی انرژی جنبشی تولیدشدهٔ اتومبیل در بزرگراه، مدل سه‌بعدی‌شکل احمد را مدل‌سازی کردند و توانستند رفتار جریان حول اتومبیل در بزرگراه را پیش‌بینی کنند. با درنظرگرفتن اینکه در طول سال بادهای موسمی تغییر می‌کنند، بررسی این تأثیرات بر عملکرد توربین بادی در بزرگراه از اهمیت برخوردار است. ازاین‌رو، سانتاکومار و همکاران [22] به بررسی عملکرد توربین ساونیوس در بزرگراه چهارلاینه پرداختند. باتوجه‌به نتایج حاصل‌شده، سرعت چرخش توربین ممکن است تا ٦٤درصد افزایش یابد.

تیان و همکاران [23-25] برای محاسبهٔ مقدار انرژی

قابل دریافت از حرکت اتومبیل‌ها در بزرگراه، با توربین محور عمودی شبیه‌سازی عددی انجام دادند. آن‌ها علاوه‌بر بررسی مقدار توان قابل دریافت از اتومبیل داخل بزرگراه، به بررسی سرعت‌های مختلف اتومبیل و همچنین فاصلهٔ بین اتومبیل و توربین در بزرگراه پرداختند.

باتوجه‌به مطالب بیان‌شده، توربین‌های داریوس نسبت به توربین‌های ساونیوس راندمان بالایی دارند ازاین‌رو، در این پژوهش برای محاسبه عملکرد این نوع توربین‌های بادی در بزرگراه، شبیه‌سازی دوبعدی ارزیابی شده است. در ضمن به ارزیابی توربین داریوس چهارپره با پره‌های مستقیم براساس روش دینامیک سیالات محاسباتی و مش متحرک تاکنون پرداخته نشده است.

معادلات حاکم

معادلات حاکم به کار برده شده در این مطالعه به شرح زیر است:

معادلهٔ پیوستگی:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \qquad (۱)$$

معادلهٔ مومنتم:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial {x_j}^2} - \acute{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + f_i \qquad (۲)$$

که در این معادلات ρ و ν به‌ترتیب چگالی هوا و لزجت سینماتیکی است و همچنین $\bar{u}$ و $\acute{u}$ میانگین سرعت و سرعت نوسانی است. همچنین f نمایانگر نیروهای وزنی و P نمایندهٔ فشار میانگین است.

مدل آشفتگی k-ω SST ازجمله مدل‌های هیبریدی است که برای پیش‌بینی بهتر جریان در نزدیکی دیواره از ترکیب ۲ مدل بهره می‌گیرد. درعمل این مدل برای رفع مشـــکل در پیش‌بینی در نزدیکی دیواره در لا یهٔ مرزی با گرادیان فشار معکوس در مدل $k-\varepsilon$ پیشنهاد شـــده اســـت. این مدل از مدل $k-\varepsilon$ اســـتاندارد برای محاســـبه خواص جریان در قســـمت جریان آزاد آشـــفتهٔ دور از دیوار اســـتفاده می‌کند و همچنین در مناطق نزدیک دیواره از مدل $k-\omega$ بهره می‌گیرد و درعمل همین تغییرحـالـت‌دادن از مـدل $k-\varepsilon$ بـه $k-\omega$ و برعکس، باعث برتری این مدل شـــده اســـت. در مدل $k-\omega$ ، معادلهٔ انتقال برای انرژی جنبشـی آشـفتگی k به‌صورت زیر تعریف می‌شود [26].

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k1}}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + P_k - \beta' \rho \qquad (۳)$$

که در معادلهٔ فوق β' ثابت‌های معادله هستند.

حال می‌توان معادلهٔ انتقال فرکانس آشـــفتگی را به‌صورت زیر تعریف کرد [26]:

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 1}}\right)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right] + \alpha_1 \frac{\omega}{k} P_k - \beta_1 \rho \omega^2 \qquad (۴)$$

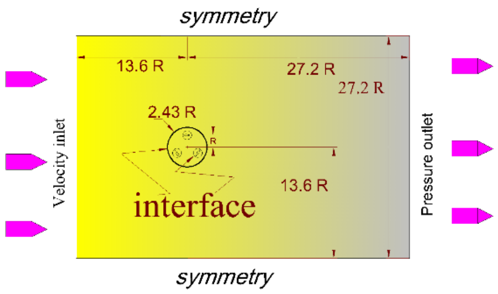
در معادلهٔ بالا β_1 ضریب ثابت بوده است.

که در روابط بالا P_k به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\left(3\mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \rho k\right) \right) \qquad (۵)$$

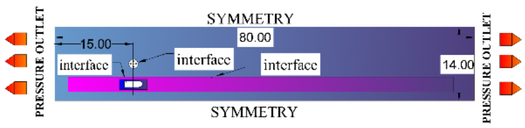
ابعاد ناحیهٔ حل و نواحی مرزی

در ابتدا برای شبیه‌سازی توربین در بزرگراه، لازم است برای اعتبارسنجی حل، توربین تحت‌تأثیر جریان باد ثابت با سرعت ۹ متر برثانیه قرار گیرد. ازاین‌رو دامنهٔ حل مطابق شکل (۲) طراحی و شبیه‌سازی شده است.



شکل ۲ ناحیهٔ حل و شرایط مرزی

سپس ابعادی که برای شبیه‌سازی توربین در کنار بزرگراه در نظر گرفته شده است، در شکل (۳) نمایش داده شده است. همچنین شرط مرزی فشار خروجی برای ۲ ضلع چپ و راست و شرط مرزی تقارن برای ۲ ضلع پایین و بالا در نظرگرفته شده است. علاوه‌براین، شرط مرزی عدم لغزش به پره‌های توربین و همچنین اتومبیل نسبت داده شده است.



شکل ۳ حوزهٔ حل

به‌علاوه، در شکل (۲) خطوطی به‌عنوان صفحهٔ میانی مشاهده می‌شود که این خطوط درواقع مرز بین ۲ ناحیهٔ مختلف است. ناحیهٔ حل به چندین ناحیه تقسیم می‌شود که ازجمله آن ناحیه‌ها می‌توان به ناحیهٔ توربین، ناحیهٔ بزرگراه، ناحیهٔ اطراف اتومبیل و همچنین ناحیهٔ ساکن اشاره کرد. به‌علاوه، اندازهٔ حوزهٔ حل باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که اتومبیل با عبور از توربین تا جایی به مسیر خود ادامه دهد که دیگر تأثیر چندانی بر روی توربین نداشته باشد.

مشخصات توربین

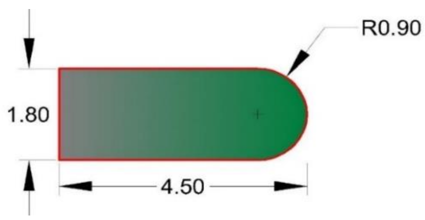
توربین استفاده‌شده در این پژوهش مشابه توربین پیشنهادشدهٔ کستلی و همکاران [27] است که در جدول (۱) مشخصات آن نمایش داده شده است.

جدول ۱ مشخصات هندسی توربین

مشخصه	مقدار
شعاع روتور	۰/۵۱۵ (متر)
تعداد پره	۳
نوع پره	ناکا ۰۰۲۱
طول وتر	۰/۰۸۵۸(متر)
مساحت جاروب‌شده توربین	۱/۰۳(مترمربع)

ابعاد هندسی اتومبیل

برای شبیه‌سازی دوبعدی اتومبیل از یک مستطیل و یک نیم‌دایره استفاده شده است که جزئیات آن در شکل (٤) نشان داده شده است.



شکل ٤ ابعاد هندسی اتومبیل

اعداد بی‌بعد

اعداد بی‌بعد تعریف‌شده در این مطالعه به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

عدد بی‌بعد سرعت نوک پره:

$$\lambda_t = \frac{r\omega}{V_\infty} \qquad (٦)$$

که در آن r شعاع روتور و ω سرعت دورانی توربین و V_∞ سرعت جریان ورودی که برابر ۹ متر برثانیه است.

$$C_{pt} = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A V_\infty^{3}} \qquad (٧)$$

از پارامتر بی‌بعدشدهٔ ضریب گشتاور و ضریب

توان در این مطالعه استفاده شده است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\lambda = \frac{r\omega}{V} \tag{۸}$$

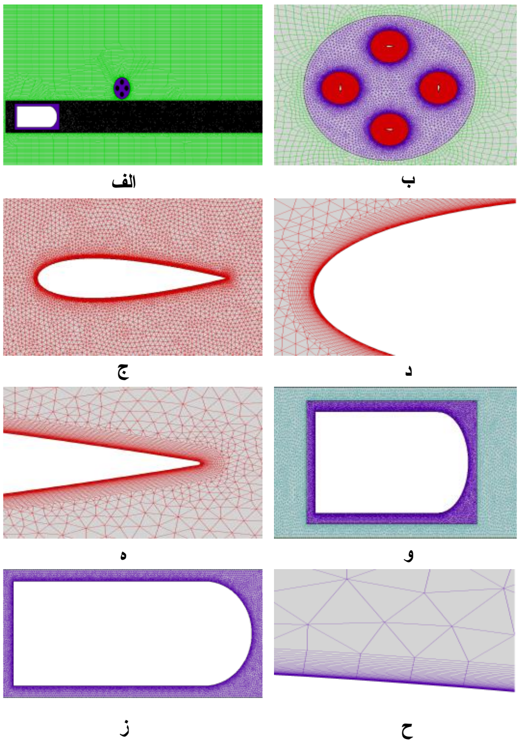
$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho V^2 A r} \tag{۹}$$

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A V^3} \tag{۱۰}$$

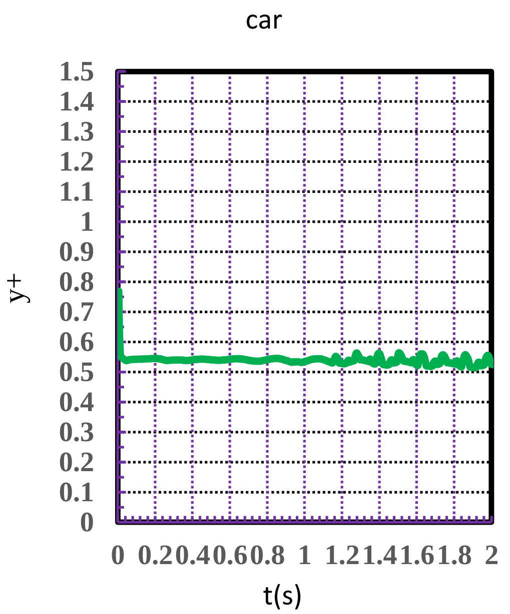
در عبارت بالا V سرعت اتومبیل که برابر ۳۲متر برثانیه و A مساحت جاروب‌شده است که باتوجه‌به دوبعدی‌بودن شبیه‌سازی، برابر قطر توربین در نظر گرفته شده است.

شبکه‌بندی حوزهٔ حل. در شکل (۵) نوع شبکه‌بندی در هر یک از قسمت‌های حوزهٔ حل نمایش داده شده است. نکتهٔ درخور ملاحظه در شبکه‌بندی موجود این است که برای نواحی توربین، بزرگراه، اطراف اتومبیل و اطراف پره‌ها از نوع مش مثلثی و برای ناحیهٔ ثابت از مش مربعی بهره گرفته شده است.

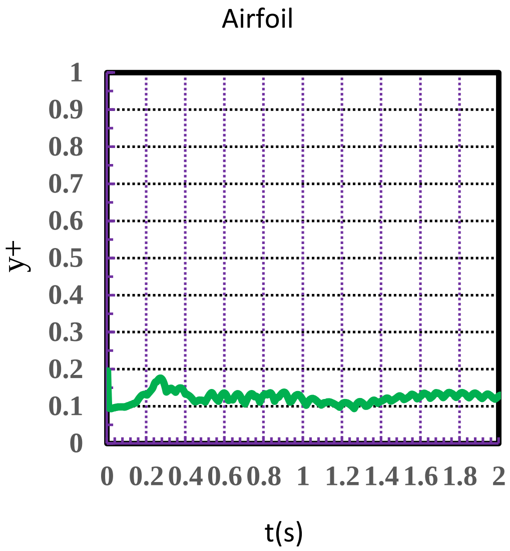
علاوه‌براین، باتوجه‌به اینکه در این پژوهش از مدل توربولانسی k-ω SST استفاده شده است، باید فاصلهٔ بین سطوح ازجمله پره‌ها و اتومبیل تا اولین سلول مش به‌گونه‌ای انتخاب شود که مقدار y^+ به زیر عدد یک برسد. به همین دلیل از مش لایهٔ مرزی برای سطوح پره‌ها و اتومبیل استفاده شده است که در شکل (۵) ملاحظه می‌شود. نیز به همین علت مقدار حداکثر y^+ برای سطوح ایرفویل و همچنین اتومبیل در شکل‌های (٦) و (٧) رسم شده است که به‌وضوح از این اشکال می‌توان این‌گونه برداشت کرد که مقدار y^+ در زمان حل برای هر یک از سطوح ایرفویل و اتومبیل به زیر مقدار یک رسیده است. تعداد سلول‌ها در بخش‌های مختلف ناحیهٔ حل عبارت‌اند از : ناحیهٔ ثابت با ٩٦٠٠٠ ، ناحیهٔ توربین ۳۵۰۰۰، ناحیهٔ هر پره ۹۹۰۰۰، ناحیهٔ بزرگراه ۹۸۰۰۰ و ناحیهٔ اطراف اتومبیل با ۷۱۰۰۰.



شکل ۵ نمایی از مش: الف) کل حوزهٔ حل ب) اطراف توربین ج) اطراف ایرفویل د) لایهٔ مرزی لبهٔ حمله ه) لایهٔ مرزی لبهٔ فرار و) بزرگراه ز) اطراف اتومبیل ح) لایهٔ مرزی اطراف اتومبیل

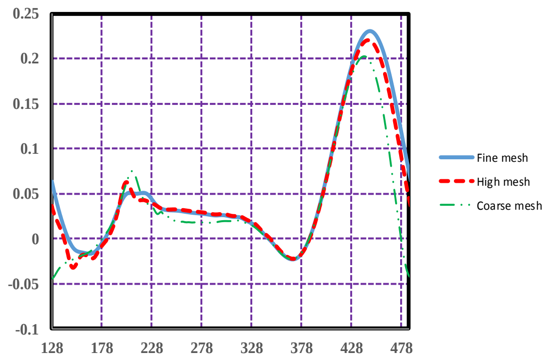


شکل ٦ مقدار +y در سطح اتومبیل



شکل ۷ مقدار +y در سطح ایرفویل

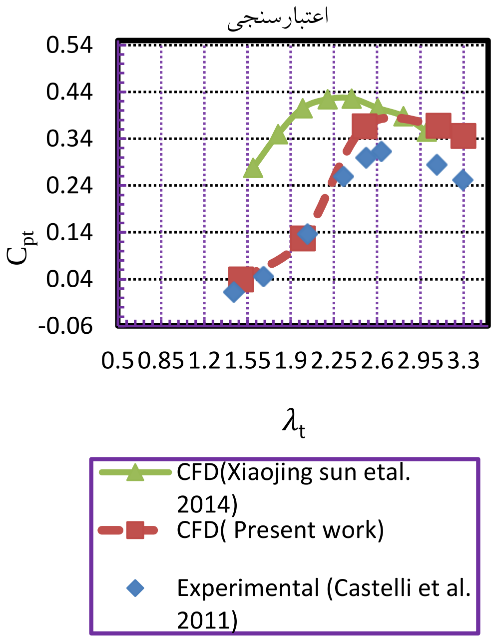
مطالعهٔ استقلال شبکه. قبل از اعتبارسنجی یک مطالعهٔ عددی نیاز ا ست تا ا ستقلال از شبکه در شبیه سازی عددی برر سی شود. ازاین‌رو، ۳ شبکه‌بندی مختلف با شبکه‌های ریز، متو سط و در شت برر سی شد که در شـکل (۸) نمایش داده شـده اسـت. باتوجه‌به شـکل، اختلاف نتایج بین شــبکه ریز و متوســط اندک بوده، درنتیجه برای ضرفه‌جویی در زمان محا سبات و دا شتن دقت کافی در شبیه سازی شبکه متو سط به‌عنوان شبکه مرجع انتخاب شده است.



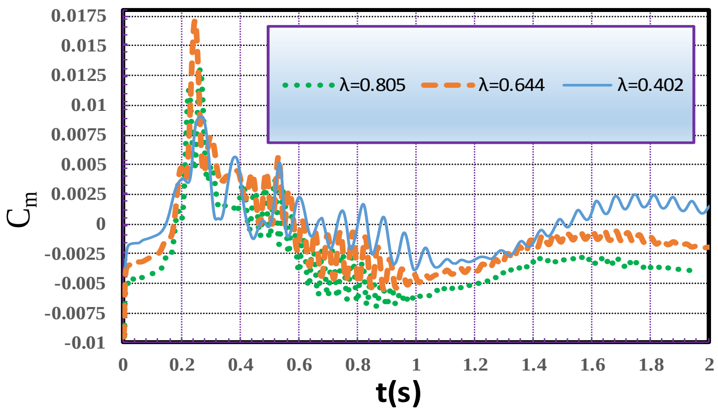
شکل ۸ استقلال از شبکه

اعتبارسنجی

اعتبار سنجی در هر یک از شبیه سازی‌های عددی نقش بسزایی ایفا می‌کند. برای اعتبار سنجی توربین حا ضر، توربین تحت تأثیر باد ثا بت قرار می‌گیرد و پس از به‌د ست‌آوردن متو سط ضریب گ شتاور در هر یک از ســرعت‌های نوک پره، ضــریب توان با ضــریب توان آزمایشگاهی مقایسه خواهد شد. همان‌طور از شکل (۹) ملاحظه می‌شـود، حل عددی حاضـر مطابقت خوبی با حل تجربی دا شته ا ست. همچنین حل عددی حا ضر با حل عددی انجام‌شــده به‌وســیلهٔ ژیااوجینگ و همکاران [28] مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می شود حل عددی حاضــر نســبت به حل عددی نام‌برده‌شــده دارای دقت بالاتری اســـت که دلیل این امر را می‌توان انتخاب نوع مدل آ شفتگی درنظرگرفته شده دانست. در حل عددی ژیااوجینگ و همکاران [28] از مدل آشفتگی Spalart-Allmaras اسـتفاده شـده اسـت. این درحالی ا ست که در مطالعهٔ حا ضر از مدل آ شفتگی k-ω SST ا ستفاده شده ا ست که این مدل ممکن ا ست نسبت به مـدل‌هـای دیگر، پیش‌بینی دقیق تری از عـملکرد توربین‌های محور عمودی داشته باشد [29,30].



شکل ۹ اعتبارسنجی



شکل ۱۰ ضریب گشتاور بر حسب زمان

نتایج

ضریب گشتاور توربین

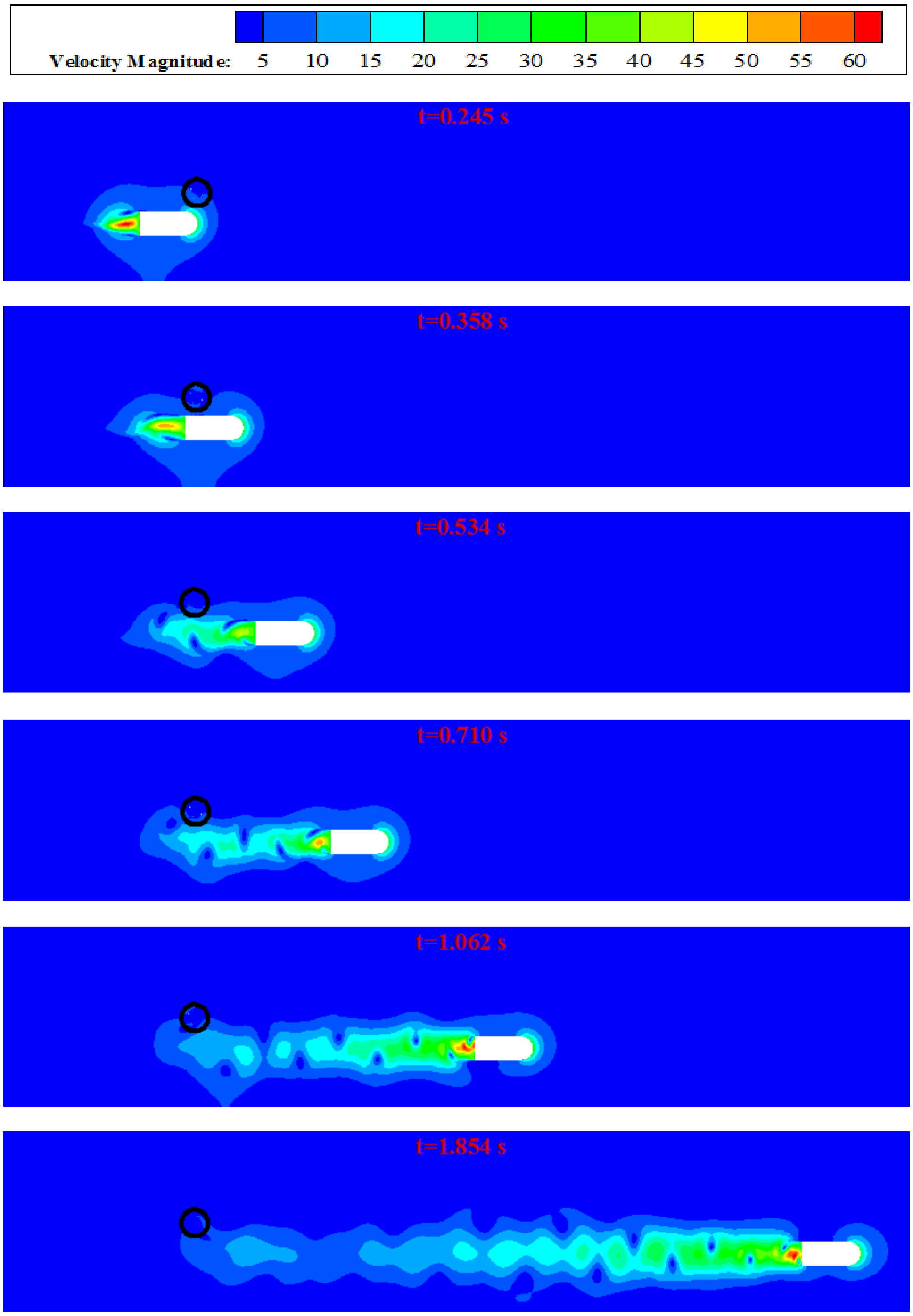
برای بررسی عملکرد توربین بادی داریوس چهارپره در بزرگراه، ضریب گشتاور توربین در ۳ سرعت نوک پره مختلف بررسی شده که جزئیات آن در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. همان‌طور که از شکل (۱۰) پیداست، اولین تغییرات قابل ملاحظه در ضریب گشتاور در ثانیهٔ ۰/۲ رخ می‌دهد و هر ۳ نمودار شکل (۱۰) در حدود ثانیهٔ ۰/۲۵ به حداکثر مقدار خود می‌رسند. باتوجه‌به ضریب گشتاور هر ۳ سرعت نوک پرهٔ بیان‌شده در شکل (۱۰)، پس از ایجاد مقدار حداکثری در حدود ثانیهٔ ۰/۲۵ ضریب گشتاور شروع به کم‌شدن می‌کند و پس از ثانیهٔ ۰/۵۷ ضریب گشتاور در بازهٔ کوچکی شروع به نوسان می‌کند. این پدیده به‌علت تأثیر بسیار ناچیزی است که اتومبیل به‌دلیل فاصلهٔ زیادش بر روی توربین می‌گذارد.

کانتورهای سرعت و ورتیسیتی

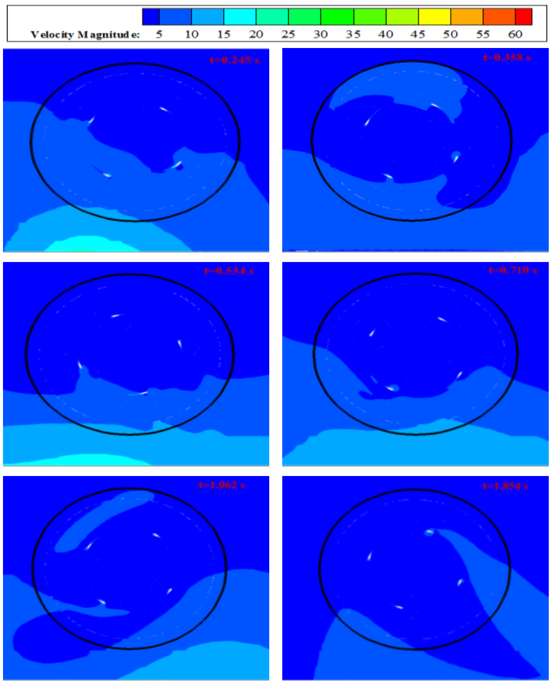
برای بررسی نحوهٔ جریان ایجادشده به وسیلهٔ اتومبیل و تغییرات این جریان در زمان‌های متفاوت، کانتورهای سرعت در زمان‌های متفاوت در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۱) ملاحظه می‌شود در ابتدا توربین تحت‌تأثیر ناحیهٔ جلو اتومبیل قرار می‌گیرد، سپس تحت‌تأثیر پشت اتومبیل. رفته‌رفته اتومبیل از توربین دور می‌شود و تأثیر اتومبیل بر توربین کمتر می‌شود تا اینکه دیگر تأثیر چندانی بر روی توربین نخواهد گذاشت. نکتهٔ مهم دیگر که در شکل (۱۱) دیده می‌شود، گردابه‌هایی است که در پشت اتومبیل به‌وجود می‌آید. این گردابه‌ها تأثیر بسزایی بر عملکرد توربین خواهند گذاشت. همچنین می‌توان مشاهده کرد که در شکل (۱۱) با دورشدن اتومبیل از توربین، این گردابه‌ها شروع به اضمحلال می‌کنند و درنتیجه بعد از مدتی، دیگر اتومبیل تأثیر چندانی بر روی توربین نخواهد گذاشت. همچنین باتوجه‌به شکل (۱۲) می‌توان دریافت که با دورشدن اتومبیل از توربین تأثیراتی که ممکن است اتومبیل بر توربین داشته باشد، رفته‌رفته کم می‌شود.

در شکل (۱۳) نحوه ایجاد و قدرت گردابه‌های در پ شت اتومبیل ملاحظه می شود. نکتهٔ قابل ملاحظه این اســـت که در هنگام حرکت اتومبیل جریان روی ۲لبهٔ کناری اتومبیل حرکت می‌کند و بعد از رسیدن به پشت اتومبیل، جریان جدا می‌شـــود و گردابه‌هایی که خلاف جهت هم در چرخش‌اند به‌وجود می‌آیند. ســپس هرچه زمان می‌گذرد، گردابه‌های ایجادشــده در پشــت اتومبیل بیشتر می‌شود. اما با دورشدن اتومبیل از توربین، قدرت

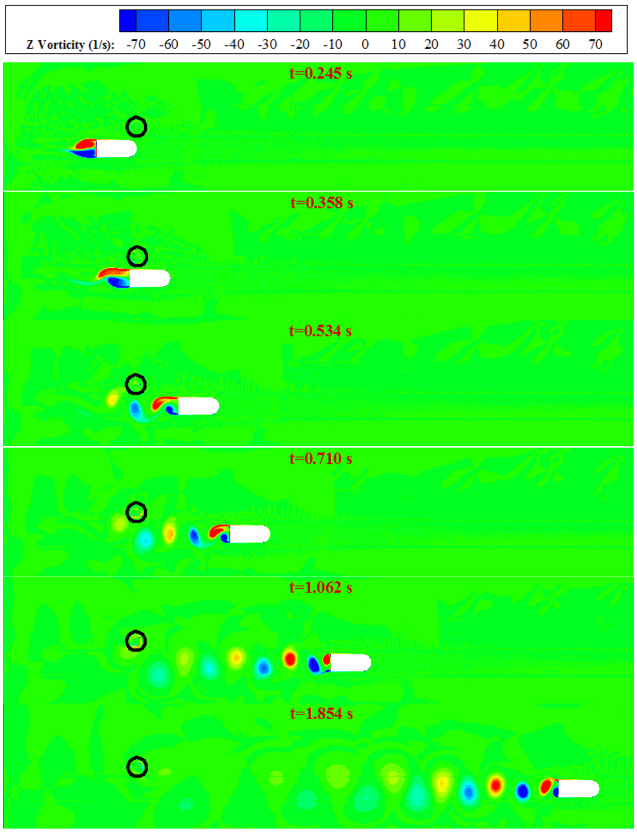
گردابه‌هایی که به توربین برخورد می‌کند کمتر می شود. پس قاعدتا تأثیری که ممکن اســـت اتومبیل بر توربین بگذارد، کمتر می‌شـــود که می‌توان به‌وضـــوح در شـــکل (۱۰) این کاهش تأثیر را دید.



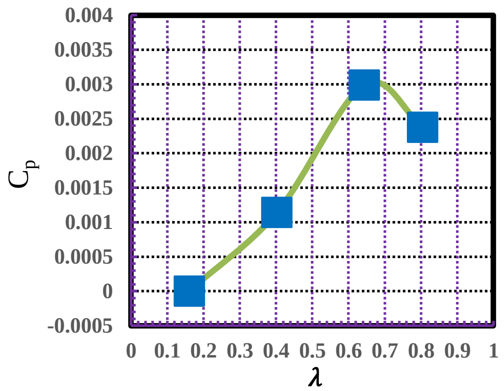
شکل ۱۱ کانتور سرعت در زمان‌های متفاوت



شکل ۱۲ کانتور سرعت در اطراف توربین در زمان‌های متفاوت



شکل ۱۳ کانتور ورتیسیتی در زمان‌های متفاوت



شکل ۱٤ ضریب توان برحسب سرعت زاویه‌ای توربین

بحث و نتیجه‌گیری

برای ارزیابی عملکرد توربین میانگین ضریب توان در ٤ سرعت نوک پره مختلف در بازهٔ زمانی ۰/۲ تا ۰/۵۷ در شکل (١٤) نمایش داده شده است.

واژه نامه

انتقال تنش برشی	SST(Shear Stress Transport)
متقارن	Symmetry
سرعت ورودی	Velocity inlet
فشار خروجی	Pressure outlet
مرزمیانی	Interface
اتومبیل	Car
بالواره	Airfoil
فاصله بدون بعد تا دیواره	y^+
ضریب گشتاور	C_m
ضریب توان	C_p
سرعت اتومبیل	V
سرعت متوسط زمانی	$\bar{u}$
انرژی جنبشی آشفته	k
تولید انرژی جنبشی آشفته	P_k
لزجت سینماتیکی	ν
لزجت ادی	μ_t
چگالی	ρ
سرعت نوک پره	λ
سرعت زاویه‌ای	ω
سرعت ورودی	V_∞
ورتیسیته	Z

تشکر و قدردانی

بخشی از محاسبات این تحقیق در مرکز محاسبات سنگین دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد که بدین‌وسیله تشکر می‌شود.

مراجع

1. GWEC. Global Wind Energy Council (GWEC), https://gwec.net/wp-content/ uploads/ vip/ GWEC_PRstats2017_EN-003_FINAL.pdf, (2017).
2. Pearson, C., "Vertical axis wind turbine acoustics", Doctoral dissertation, University of Cambridge, (2014).
3. Council, G. W. E., Global Wind Report 2017-Annual Market Update. (2017).
https://gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_PRstats2017_EN-003_FINAL.pdf
4. Baniassadi, A., Shirinbakhsh, M., and Torabi, F., "Multivariate optimization of off-grid wind turbines

with variable demand-Case study of a remote commercial building", *Renewable Energy*, Vol. 101, pp. 1021-1029, (2017).

5. Wahab, A., Abas, M., and Saad, N., "Ac Voltage Stabilizer For Wind Powered Application In Malaysia", in International Symp. & Exhibition on Sustainable Energy & Environ, (ISESEE 2006), ,(2006).
6. Saad, M. M. M., and Asmuin, N., "Comparison of horizontal axis wind turbines and vertical axis wind turbines", *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*, Vol. 4(08), pp. 27-30, (2014).
7. Saeidi, D., Sedaghat, A., Alamdari, P., Alemrajabi, A. A , "Aerodynamic design and economical evaluation of site specific small vertical axis wind turbines", *Applied Energy*, Vol. 101, pp. 765-775, (2013).
8. Kenjereš, S., de Wildt, S., and Busking, T., "Capturing transient effects in turbulent flows over complex urban areas with passive pollutants", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 51, pp. 120-137, (2015).
9. Tjiu, W., Marnoto, T., Mat, S., Hafidz Ruslan, M., Sopian, K., "Darrieus vertical axis wind turbine for power generation I: Assessment of Darrieus VAWT configurations", *Renewable Energy*, Vol. 75, pp. 50-67, (2015).
10. Paraschivoiu, I., "Wind turbine design: with emphasis on Darrieus concept", Presses inter Polytechnique, (2002).
11. Seifert, H., Westerhellweg, A., and Kröning, J., "Risk analysis of ice throw from wind turbines", *Boreas*, Vol. 6(9), pp. 2006-01, (2003).
12. Rossetti, A., and Pavesi, G., "Comparison of different numerical approaches to the study of the H-Darrieus turbines start-up", *Renewable Energy*, Vol. 50, pp. 7-19, (2013).
13. Mohamed, M. H., Dessoky, A., and Alqurashi, F., "Blade shape effect on the behavior of the H-rotor Darrieus wind turbine", Performance Investigation and Force Analysis, Energy, (2019).
14. Hosseini, A., and Goudarzi, N., "Design and CFD study of a hybrid vertical-axis wind turbine by employing a combined Bach-type and H-Darrieus rotor systems", *Energy Conversion and Management*, Vol. 189, pp. 49-59, (2019).

۱۵. ساغری‌چی، امیر و مغربی، محمدجواد و عرب گلارچه، علیرضا، "بررسی جریان و ضریب گشتاور توربین بادی داریوس برحسب تغییرات زاویهٔ گام و نسبت سرعت نوک پره"، https://civilica.com/doc/791618، (۱۳۹۵).

۱۶. ساغری‌چی، امیر و مغربی، محمدجواد و عرب گلارچه، علیرضا، "بررسی عددی تأثیر زاویهٔ گام‌های ثابت و متغیر پره بر واماندگی دینامیکی جریان حول پرهٔ توربین بادی داریوس"، https://civilica.com/doc/911971، (۱۳۹۵).

17. Zhou, H., Lu, Y., Liu, X., Chang, R., Wang, B., "Harvesting wind Energy in low-rise residential buildings: Design and optimization of building forms", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 167, pp. 306-316, (2017).

18. Belmili, H., Cheikh, R., Smail, T., Seddaoui, N., Biara, R.W.,"Study, design and manufacturing of hybrid vertical axis Savonius wind turbine for urban architecture", *Energy Procedia*, Vol. 136, pp. 330-335, (2017).
19. Bethi, R.V., Laws, P., Kumar, P., Mitra, S., "Modified Savonius wind turbine for harvesting wind energy from trains moving in tunnels", *Renewable Energy*, Vol. 135, pp. 1056-1063, (2019).
20. Saqr, K. M., and Musa, M. N., "A perspective of the Malaysian highway energy consumption and future power supply", *Energy Policy,* Vol. 39(6), pp. 3873-3877, (2011).
21. Musa, N., Osman, K., and Hamat, A. M. A., "Renewable Energy from Induced Airflow Generated by Cruising Ground Vehicles in Tandem using RANS", *Energy Procedia,* Vol. 14, pp. 1877-1882, (2012).
22. Santhakumar, S., Palanivel, I., and Venkatasubramanian, K., "A study on the rotational behaviour of a Savonius Wind turbine in low rise highways during different monsoons", *Energy for Sustainable Development*, Vol. 40, pp. 1-10, (2017).
23. Tian, W., Mao, Z., An, X., Zhang, B., Wen, H., "Numerical study of energy recovery from the wakes of moving vehicles on highways by using a vertical axis wind turbine", *Energy*, Vol. 141, pp. 715-728, (2017).
24. Tian, W., Song, B., and Mao, Z., "Numerical investigation of wind turbines and turbine arrays on highways", *Renewable Energy,* Vol. 147, pp. 384-398, (2020).
25. Tian, W., Mao, Z., and Li, Y., "Numerical Simulations of a VAWT in the Wake of a Moving Car", *Energies,* Vol. 10(4), pp. 478, (2017).
26. Kaewbumrung, M., Tangsopa, W., and Thongsri, J., "Investigation of the Trailing Edge Modification Effect on Compressor Blade Aerodynamics Using SST k-ω Turbulence Model", *Aerospace*, Vol. 6(4), pp. 48, (2019).
27. Raciti Castelli, M., Englaro, A., and Benini, E., "The Darrieus wind turbine: Proposal for a new performance prediction model based on CFD", *Energy,* Vol.36 (8), pp. 4919-4934, (2011).
28. Sun, X., Wang, Y., An, Q., Cao, Y., Wu, G., "Aerodynamic performance and characteristic of vortex structures for Darrieus wind turbine", *I. Numerical Method and Aerodynamic Performance. Journal of Renewable and Sustainable Energy,* Vol. 6(4), pp. 043134, (2014).
29. Hassan, G. E., Hassan, A., and Youssef, M. E., "Numerical investigation of medium range re numbers aerodynamics characteristics for naca0018 airfoil", *CFD letters*, Vol. 6(4), pp. 175-187, (2015).
30. Wafula, D., Wang, C.,Wei, Y., N.Kamau, J., A, Louis., M.Danao., , "A numerical analysis of unsteady inflow wind for site specific vertical axis wind turbine", *Rew Energy,* Vol. 76, pp. 648-661, (2015).

Numerical Investigation of Darrieus Wind Turbine Near a One-Way Highway

Sadegh Toudarbari[1] Mohamad Javad Maghrebi[2]

1. Introduction

Nowadays, wind turbines is a controversial subject among researchers. Wind turbines, based on the rotational axis direction, are separated into horizontal axis wind turbines and vertical axis wind turbines. In the horizontal axis wind turbine type, the rotational axis is parallel with the earth, and in the vertical axis wind turbine, the rotational axis is perpendicular to the earth surface. The vertical axis wind turbines are desirable choices for urban areas. The vertical axis wind turbines could be used in several places such as at the top of the roof, beside railways and highways. Many studies have been conducted to investigate the operation of these turbines on the highway for harnessing the energy which is stored in the wake of vehicles. The vertical axis wind turbine is separated into two different types for instance drag-based (Savonius) and lift-based (Darrieus). Darrieus wind turbines have high efficiency in comparison with Savonius wind turbines. On the contrary, Darrieus wind turbines are weak in self-starting capability in comparison with Savonius wind turbines.

In this study, the operation of Darrieus wind turbine on the one-way highway was measured by simulating the turbine beside the highway. The CFD method is used by utilizing the URANS method. In order to model the rotation of the turbine, the sliding mesh method was used. Moreover, the dynamic mesh technique was applied to simulate the vehicle movement. First of all, mesh independency was evaluated. After that, the validation of the present work was performed. Furthermore, the effect of the vehicle on the turbine was assessed at different tip speed ratios.

2. Case Study

Specifications of the 4-blade Darrieus wind turbine which is considered in this study are shown in Table 1.

Table 1. Turbine specifications

Feature	Value
Radius of the rotor (R) $[m]$	0.515
Number of blades	4
Blade profile	NACA 0021
Swept area $[m^2]$	1.03
Blade chord $[m]$	0.0858

The computational domain and boundary conditions that was applied in this simulation is shown in Figure 1.

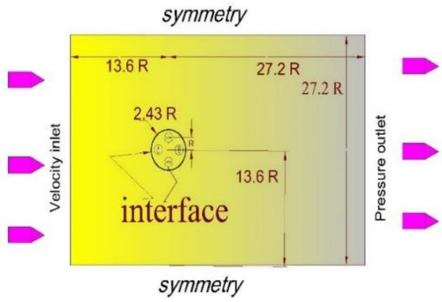


Figure 1. Computational domain

3. Mesh Independency and Validation

In the numerical simulation, the mesh independency plays a substantial role in time in terms of time-consuming and of results accuracy. Therefore, the mesh independency should be prepared. The mesh independency is illustrated in Figure 2. Consequently, in order to decrease the time solution and enhance the outcome accuracy the fine mesh was selected for simulations.

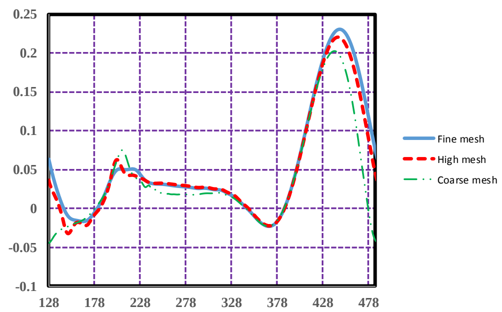


Figure 2. Mesh independency

[1] M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad.

[2] Corresponding Author: Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad. E-mail: mjmaghrebi@um.ac.ir .

The domain (Figure 1) is used to validate the numerical simulation. Power coefficients of the present study were compared with experimental outcomes that were created by Raciti Castili. The validation is shown in Figure 3. As Figure 3 shows, the results of the present study are in line with experimental results.

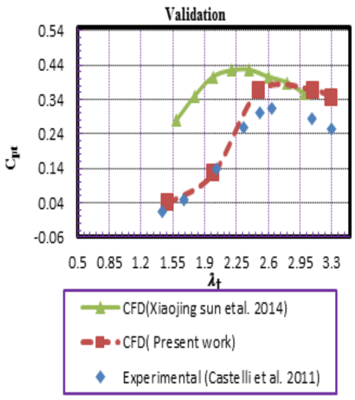


Figure 3. Validation

4. Computational Domain

In the next stage, the turbine beside a highway was simulated. The proposed computational domain is shown in Figure 4. For the purpose of simulating the rotation of the turbine and vehicle movement, the sliding mesh and dynamic mesh technique were used, respectively. The velocity of the vehicle is 32 meter per second.

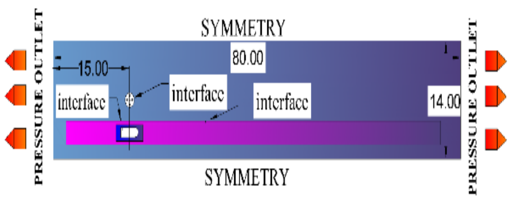


Figure 4. Computational domain and boundary conditions

5. Results

For the aim of evaluating the turbine performance on the highway, the toque coefficient of the turbine against the time at several tip speed ratios were examined according Figure 5. According to Figure 5, the turbine torque coefficient at $\lambda = 0.644$ has a better operation compared to the other tip speed ratios.

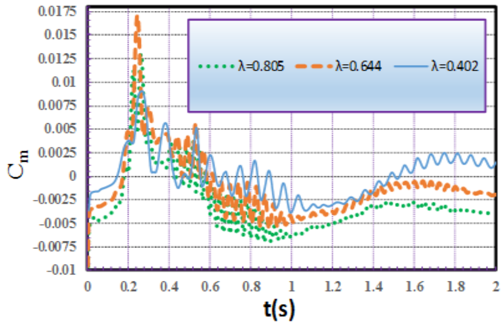


Figure 5. Torque coefficient against time

6. Conclusion

The mean power coefficient of the turbine versus tip speed ratios is demonstrated in Figure 6. As Figure 6 shows, the power coefficient of the turbine has a rising trend firstly and after the power coefficient touches the maximum value at $\lambda = 0.644$ the trend of the power coefficient starts to decline. Consequently, the optimum tip speed ratio is $\lambda = 0.644$ in which the power coefficient is maximum.

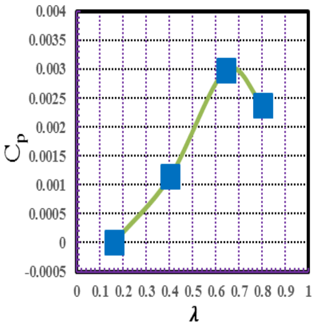


Figure 6. Power coefficient against time